4.4 冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術に関する研究

- 研究予算: 運営費交付金(一般勘定)
- 研究期間: 平 23~平 26
- 担当チーム: 雪崩・地すべり研究センター

雪氷チーム

研究担当者: 秋山一弥、松下拓樹、池田慎二(雪崩・地 すべり) 松澤勝、伊東靖彦、上田真代、原田裕介(雪 氷)

【要旨】

冬期の気温上昇に伴い、湿雪雪崩の発生が増加することが懸念されている。しかし、湿雪雪崩の発生条件については不明な点が多く、雪崩対策の現場では湿雪雪崩の危険度評価が難しい状況にある。そこで、湿雪雪崩の危険度評価に向けて「湿雪雪崩事例の気象」「積雪内の水の浸透に関する現地実験」「多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験」「水の浸透や帯水層の形成を再現することが可能な積雪モデルの開発」「スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度」「冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術の提案と事例解析」を行った。

キーワード:湿雪雪崩、積雪モデル、降雨、融雪、斜面積雪、積雪観測、発生危険度評価

1. はじめに

近年の気候変動に伴い、我が国において冬期の気温 上昇が報告されており¹⁾、これによって降水形態が雪 から雨へ、また積雪の性質が乾雪から湿雪へ変化し、 雪崩などの雪氷災害の発生形態などにも変化が生じる ことが懸念されている。たとえば寒冷な気候である北 海道においても厳冬期に降雨が生じ、雪崩が発生する ことが報告されている²⁾。

このように雪崩災害において、冬期の気温上昇や降 雨の増加は湿雪雪崩による災害の多発につながる可能 性があるが、その湿雪雪崩の発生条件について不明な 点が多く、雪崩対策の現場において湿雪雪崩の危険度 判断が難しい現状にある。このため危険度評価技術の 開発により、事前の警戒避難や通行規制を的確かつ効 率的に実施する体制の整備が求められている。

そこで本研究では、湿雪雪崩の発生条件の解明と危 険度評価技術の検討を行った。具体的には、湿雪雪崩 の発生条件解明のために、

- (1) 湿雪雪崩事例の気象解析
- (2) 積雪内の水の浸透に関する現地実験

(3) 多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験

を行い、また湿雪雪崩危険度評価技術の提案に向けて、 (4) 水の浸透や帯水層の形成を再現することが可能 な積雪モデルの開発

- (5) スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の 検討
- (6) 冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術の提案と事例解析

を実施した。これらの結果について、以下で説明する。

2. 湿雪雪崩事例の気象解析

湿雪雪崩が発生するときの気象条件を明らかにする ために、雪崩発生箇所近傍の気象観測データを用いて 気象解析を行った。特に、厳冬期と融雪期における湿 雪雪崩の発生形態と発生条件について、雪質等の積雪 特性を現す指標を加えて検討を行った。

2.1 対象とした湿雪雪崩事例

平成 23 年度に収集した雪崩事例のうち、雪の乾湿 及び全層と表層の雪崩発生形態が明らかな湿雪雪崩事 例 123 件を対象に、雪崩発生箇所近傍の気象観測デー タを用いて、湿雪雪崩発生の気象条件に関する解析を 行った。

2.2 気象観測データとデータの補正

解析に用いた気象観測データは、雪崩発生地点近傍 の北海道開発局道路テレメータと気象庁アメダスの気 温、積雪深、降水量、日照時間、風速の1時間間隔の 観測データである。雪崩発生箇所の気温は、気温減率 (=-0.0065 /m)を用いて標高補正し、降水量は、横山ら(2003)³⁾の方法によって降水量計による降水粒子の補足率を考慮して補正した。補正した気温と降水量を用いて、近藤ら(1995)⁴⁾に従い気温が 1.8 以上の場合を降雨、1.8 未満を降雪として、降水量から降雨量(mm)を求めた。日射量の日積算値(J/m²)は、近藤ら(1991)⁵⁾の手法を用いてアメダスの日照時間(h)から推定した。また、積雪の表面付近における融雪量(mm)は、水津(2002)⁶⁾の簡易熱収支法に従って求めた。以下に降雨量と融雪量の推定方法の詳細を述べる。 2.3 降雨量と融雪量の推定方法

2.3.1 降雨量の推定方法

近藤ら(1995)⁴⁾の雨雪判別気温(=1.8)を用い て、標高補正を行った1時間ごとの気温の観測値Tに 対してT>1.8()を雨、T 1.8()を雪と判断 した。そして、気温による雨雪判別によって、捕捉率 を考慮した1時間間隔の降水量P(mm)から降雨量 (mm)と降雪量(mm)に分けて算出した。

2.3.2 融雪量の推定方法

積雪表面付近における融雪量 *M*_s (mm) は、水津 (2002)⁶の方法に従い、気象観測データから、式(1)右 辺の各項の熱量による融雪量を求め、これらを合計し て求めた。

 $M_s = NRS + NRL + H + tE + R + Q_i$ (1) ここで、NRS は短波長放射、NRL は長波長放射、H は顕熱伝達、tE は潜熱伝達、R は降雨による搬送熱、 Q_i は積雪層内での貯熱変化による融雪量 (mm) であ り、標高補正を行った気温の観測値や日射量と降雨量 の推定値から融雪量を求めた。

2.3.3 雪質に関する指数

Kawashima et al.(1994)⁷⁾よる積雪内の温度勾配に関 する指数 *TG* と融雪に関する指数 *MF* を算出した。

$$TG = |Ta/Hs| \tag{2}$$

$$MF = \Sigma Ta_{+}/Hs \tag{3}$$

ここで、Ta は根雪期間の平均気温()(ただし Ta > 0の場合 TG=0) Hs は根雪期間の平均積雪深(cm) ΣTa_+ は根雪期間の0 以上の日平均気温の積算値(day) である。後述するように、Kawashima et al.(1994)⁷⁾は、 $TG \ge MF$ を用いることで、積雪をしまり雪、ざらめ雪、 こしもざらめ雪に分ける方法を提案しており、ここで は $TG \ge MF$ を雪質に関する指数と呼ぶ。





図 - 2 積雪内の温度勾配に関する指数 TG と融雪に 関する指数 MF の関係

2.4 湿雪雪崩事例の気象解析結果

湿雪雪崩は、降水による積雪の上載荷重の増加の他、 積雪内に水が浸透することにより積雪強度が小さくな ることで発生すると考えられる。よって、積雪への水 の供給量を降雨量と融雪量の合計値と考えて、湿雪雪 崩の発生条件の検討を行った。

図 - 1は、湿雪雪崩発生の前日と当日(発生時刻ま で)の降雨量と融雪量の合計と発生時の積雪深の関係 であり、これらの関係を厳冬期の2月と融雪期の3月 に分けて示した。厳冬期の2月(図 - 1a)は、積雪へ の水の供給量が少なく、表層雪崩の発生が多いことが 特徴である。特に、積雪が深いと表層雪崩となる傾向 がみられる。一方、融雪期の3月(図 - 1b)は、積雪 への水の供給量が多くなり、全層雪崩がほとんどであ る。以上のように、湿雪雪崩発生の気象条件として、 厳冬期の2月は少ない水の供給量で湿雪表層雪崩が発 生する傾向にあり、融雪期の3月は水の供給量が多く 湿雪全層雪崩が発生する傾向にあるといえる。なお、 図 - 1 には雪崩発生箇所近傍の気象観測所において 積雪深が0cm である場合も示した。

3.で述べる積雪内の水の浸透実験によると、しまり 雪主体の斜面では、水は積雪層に沿って斜面下方に流 れる傾向があり、積雪底面には容易に到達しない。し かし、ざらめ雪が多くなると、水は積雪底面へ浸透し ていく。つまり、雪質などの積雪の層構造によって湿 雪雪崩の発生形態(全層、表層)が異なり、これによ って図 - 1のような関係がみられたと考えられる。

そこで、図 - 2 に、雪質に関する指数 $TG \ge MF$ の 関係を示す。図中に示す実線と破線は、Kawashima et al. $(1994)^7$ よる雪質を分ける目安である。図 - 2 より、 表層雪崩では数事例を除いて MF が小さく、しまり雪 やしもざらめ雪が主体の積雪で雪崩が発生したと考え られる。ただし、全層雪崩はばらつきが大きく、TG $\ge MF$ からの発生条件は明確ではないが、表層雪崩に 比べて TG が小さく MF が大きい条件でも全層雪崩が 発生している。

3. 積雪内の水の浸透に関する現地実験

2.で行った湿雪雪崩事例の気象解析結果によると、 厳冬期と融雪期で湿雪雪崩の発生条件が異なることが 示された。この要因を明らかにするために、積雪内の 水の浸透状況と雪質等の積雪層構造との関係に着目し て、以下に示す現地実験を行なった。

3.1 実験方法

実験は、札幌市南区定山渓(定山渓ダム流木処理場)

の平地と隣接する斜面(勾配は約30°)で、2013年3 月19日と4月23日に行った。実験では、自然積雪の 表面に黄色の蛍光染料(フルオレセイン)を混ぜた水 を散布し、積雪断面観測により積雪内の水の浸透状況 を記録した。図-3と図-4に示すように、散水範 囲は幅4m×奥行2mで、雪面から1mの高さに設置し た散水ノズル2個(噴角90°)により、毎分41の水を 1時間散布(散水量30mmh⁻¹)した。ポンプには減圧 弁と流量計を備え付け、散水中の流量が一定になるよ うにした。また、積雪断面観測を、散水前と散水開始 から4時間後まで1時間間隔で行い、雪温と密度を鉛 直方向に約10cm 間隔または層構造ごとに測定した。 散水前の積雪断面観測では、雪質と粒径も観察した。



図 - 3 散水範囲と散水の状況



図 - 4 散水装置

3.2 実験結果

最初の実験を行った3月19日の天候は曇り時々晴れ、 実験中の気温は3.2~-2.6、散布した水の温度は5 であった。図-5aは、水を散布する前の平地と斜面 における積雪の層構造と、水を散布した後に多くの水 を保持して滞水した層の位置である。図-6は、散 水開始から2時間後の水の浸透状況、図-7は、散水 前と散水開始から2時間後の雪温と密度の鉛直分布で ある。散水前の雪温は、斜面では雪面から深さ約 30cmまで0 でそれより下は0 以下であったが、平 地では全層0 に近い温度状況であった。平地と斜面 の積雪構造(図 - 5a)に大きな違いはないが、散水開 始から2時間後の平地(図 - 6a)では、多くの水を保 持して滞水した層があり、水は滞水した層の任意箇所 から集中的に流下して地面に達した。一方、斜面(図 - 6b)では、雪面から約30cm下の層で滞水し、水は この層に沿って斜面下方に流れ地面に到達しなかった。 滞水した層に対応して密度の増加が測定され(図 -7b)、またこの層は雪温0 の境界付近に位置してい る(図 - 7a)。よって、融雪が本格化する前の雪温 0 以下のしまり雪が残る斜面積雪では、水は滞水し た層に沿って斜面下方に流れる傾向が強く、地面に到 達する可能性は低いと考えられる。

2回目の実験を行った4月23日の天候は晴れ、実験 中の気温は10.7~9.4 、散布した水の温度は9.8 で ある。図-5bは、散布前の積雪層構造と散布後に多 くの水を保持した層の位置、図-8は、散水開始か ら1時間後の水の浸透状況、図-9は、散水前と散水 開始から1時間後の雪温と密度の鉛直分布である。散 水前の雪温は、平地と斜面ともに全層0 であり(図 -9)、雪質はざらめ雪が多く所々に氷板としまり雪 が存在した(図-5b)。水の浸透状況を比較すると、 平地(図-8a)では散水開始から1時間後には水が地 面に到達したが、斜面(図-8b)では滞水した層に沿 って流れる水と滞水した層から鉛直方向に流れる水が 確認できた。よって、融雪が進行した雪温0 の斜面 積雪では、水の地面への到達は平地より遅れるものの、 水は階段状に流下して地面に到達すると考えられる。



図 - 5 散水前の積雪層造と散水後の滞水層の位置 (a)第1回実験(3月19日)、(b)第2回実験(4月23日)。



図 - 6 散水開始から2時間後の積雪断面 第1回実験(3月19日)、(a)平地、(b)斜面。



図 - 7 散水前と散水開始から2時間後の雪温と密度 第1回実験(3月19日)、(a)平地、(b)斜面。



図 - 8 散水開始から1時間後の積雪断面 第2回実験(4月23日)、(a)平地、(b)斜面。



図 - 9 散水前と散水開始から1時間後の雪温と密度 第2回実験(4月23日)、(a)平地、(b)斜面。

以上、積雪内への水の浸透に関する現地実験を行っ た結果、しまり雪主体の斜面では、水は積雪層に沿っ て斜面下方に流れる傾向があり、積雪底面には容易に 到達しない。しかし、ざらめ雪が多くなると、水は積 雪底面へ浸透していく。つまり、雪質などの積雪の層 構造によって水の浸透状況が異なり、これが湿雪雪崩 の発生形態(全層、表層)に影響すると考えられる。

4. 多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験

積雪中の含水率が大きいと、積雪の破壊強度が小さ くなることが知られている⁸⁹⁹¹⁰。しかし降雨が積雪 中へ浸透する過程における、積雪の破壊強度変化につ いて観測した事例がないことから、これを把握するこ とを目的として多層構造を持つ積雪層内への降雨の浸 透実験を行った。実験は、実験テーブルを平らにして 平地を模擬した場合(以降:平面)と、実験テーブル を 30°に傾けて斜面を模擬した場合(以降:斜面)で 行った。ここでは、これらの実験結果を比較する。

4.1 実験方法

自然環境下では積雪状態、温湿度、降雪降雨のコン トロールが難しいことから、国立研究開発法人防災科 学技術研究所雪氷防災研究センター新庄雪氷環境実験 所の雪氷防災実験棟において人工雪を用いて実験する こととした。実験棟の広さおよび一度に作成できる雪 試料のサイズの制約から、実験は、以下のとおり平面 と斜面で日程を分けて行った。

平面: 2012年1月16日~1月20日 斜面: 2013年1月28日~2月2日

4.1.1 雪氷防災実験棟

雪氷防災実験棟では、室温を一定に保つことが出来 るほか、人工雪による降雪、降雨が可能となっている。 それぞれの設定可能な環境範囲は表 - 1 に示す通り である。本実験棟では樹枝状の降雪Aと球形の降雪B の2種類の雪が降雪可能となっている。各々人工雪の 諸元を表 - 1 に示す。

4.1.2 実験準備 (積雪層の形成)

大きさが3 m×5 mの降雪テーブル(写真 - 1)の上 に、室温による熱が底面から積雪に伝導し難いよう厚 さ約9.5 cmのスタイロフォームを敷き詰め、さらに野 外から自然雪(しまり雪)を厚さ10 cm 程度敷き詰め た。こののち室温を氷点下にして雪面に水を噴霧し厚 さ数 mmの薄い氷盤を形成させた。

この上に降雪 B を 10cm、さらに降雪 A を圧雪した ものを 20cm 積層した(図 - 10)。ただし、斜面におい

表 - 1 雪氷防災実験棟で設定可能な環境

気温	- 30 ~+25
降雨	0~2 mm/h
降雪 A	降雪強度:0~1 mm/h(水換算)
	結晶形:樹枝状結晶(径 0.5~5 mm)
降雪 B	降雪強度:0~5 mm/h(水換算)
	結晶形:球形モデル(径約 0.025 mm)



写真 - 1 雪氷防災実験棟



図 - 10 積雪層の構成(実験前) (厚さは実験テーブルを傾ける前のもの)

ては実験テーブルを 30°に傾けた際の厚さである。 なお、詳細な積雪層の作成過程は平成 23 年度、24 年 度の報告書を参照されたい。

4.1.3 降雨実験

4.1.2 で作成した積雪層に、2mm/h で6時間降雨させ、 降雨中の一定間隔と降雨前後に積雪観測を実施した。 積雪観測項目は層構造、雪温、密度、硬度、重量含水 率(以下、単に含水率とする)などである。測定方法は おおむね「積雪観測ガイドブック」¹¹⁾に準じ、重量含 水率の測定には熱量式(遠藤式)含水率計を用いた。

4.2 観測結果と今後の課題

図 - 11 に雪温が0 となった積雪層の高さの推移、
 図 - 12 に平均密度の推移、図 - 13 に積雪の全層厚に
 対するざらめ雪の層厚を占める割合を「ざらめ率」と

して、その推移を示したものである。降雨後の推移は 斜面と平面で概ね類似した傾向を示している。雪温が 0 となった積雪層の高さに関しては、斜面の方がより 早く積雪下層まで到達する結果となっているが、これ は斜面の特性ではなく、ばらつきの問題である可能性 もある。これについて同時に測定している熱電対によ る雪温計測データと合わせて今後も検討が必要である。



降雨後の時間経過とざらめ率の推移

図 - 13

5. 水の浸透や帯水層の形成を再現することが可能な積 雪モデルの開発

積雪モデルとは、気象データ(気温、降水量、日射、 湿度、放射収支、風速等)を入力値として積雪層構造、 雪質、密度、含水率等を出力するものである。積雪モ デルの開発は積雪層構造の推定には有用であり、また 積雪内部の安定度評価に寄与すると考えている。

そのため本研究では、冬期の降雨等に伴う雪崩災害 の危険度評価に適する積雪モデルとして積雪への水の 浸透や帯水層の形成を再現することが可能な積雪モデ ルの開発を行った。

5.1 既往の積雪モデルにおける課題

実際の積雪では、均質に降雨や融雪水が積雪内に浸 透するのではなく、局所的に急速に下の積雪層に水が 浸透する「水みち」が形成される¹²⁾¹³⁾(図 - 14)。現 在、雪崩の危険度評価への活用を考慮した積雪モデル の主要なものは、フランスの CROCUS (Brun et al.¹⁴⁾¹⁵⁾)とスイスの SNOWPACK (Lehning et al.¹⁶⁾ Lehning et al.¹⁷⁾)である。これらは主にヨーロッパの山 岳地における乾雪雪崩の危険度評価を想定しており、 湿雪雪崩には重点が置かれていない。Hirashima et al.¹⁸⁾は SNOWPACK における水の浸透の再現方法につ いて改良を試みているが、水の浸透を均一に扱ってお り、水みちは考慮されていない。このため既往の積雪 モデルでは、水の浸透が均一に再現されるため、ざら め雪層が多く見積られる(図 - 14B)。一方、 Katsushima et al.¹⁹によるモデルは、仮想的に積雪を水 みち領域と非水みち領域に分けることによって、積雪 層の再現性を高めるよう工夫されている(図 - 14C)。 すなわち、水の浸透によって増加する積雪の空隙含水 率に閾値を設け、それを超える浸透水の供給があった 際には、以降の浸透水は水みちに流下するよう設定し ている。しかしこのモデルを雪崩危険度評価に活用す るには、帯水層における含水率の閾値と、水みちへの 流出量の設定について課題が残されている。

5.2 水みちへの流量の検討

5.1 を踏まえ、平成 23 年度に平地と斜面において定期 的に積雪観測を実施し、浸透水の影響に着目して斜面 と平地の積雪を比較した結果、平地と斜面では雪質が 大きく異なり、その原因は水の浸透状況の差異によっ てもたらされることが示唆された。また、平成 24 年 度に Katsushima et al.¹⁹によるモデルを用いて上記のデ ータを解析した結果、水みちが形成される空隙含水率 の閾値について斜面と平地で異なる値を設定すること により積雪層の再現性が良くなることが示された。

そこで、ここでは、2011-12 年に 2012-13 年、 2013-14 年の 2 冬期を加えた計 3 冬期の観測データと それらの解析結果を基に斜面積雪における水みちへの 流出量について検討を行った。



グラフ中の白い部分は「しまり雪」黒い部分はざらめ雪を示す。 図 - 14 既往の積雪モデルにおける水の浸透の再現方法

5.2.1 検証に用いた積雪断面観測データ

水みちへの流量の検討に用いた積雪断面観測データ は、森林総合研究所十日町試験地において観測したも のである。平地の観測は露場において、斜面の観測は、 勾配 40 °の北東向き試験斜面において実施した。露 場のデータは森林総合研究所十日町試験地による観測 である。

観測項目は、雪温、層構造、雪質、粒度、密度 (100cc サンプラー)、硬度(プッシュプル)、含水率(デ ノス式)であり、観測頻度は約20日に1回実施した。

5.2.2 解析方法

Katsushima et al.によって提案された水みちへの流出 量をパラメータ化した積雪モデル¹⁹⁾を用いて、実測の MF_r(%): ざらめ率(積雪全層の層厚に対するざらめ 雪層の層厚の総和の占める割合、式(4))を最もよく再現 できる水みちへの流出量を求めた。この際、算出され たざらめ率の実測値に対するモデル計算値の二乗平均 誤差(RMSE)を再現性の指標とした。水みちへの流出 量 $A_{wc}(t)$ (kg m⁻²)は、浸潤前線の空隙含水率が一定値 を超えた際に水みちが形成され水が排出されると仮定 して、この際の浸潤前線の空隙含水率を閾値 St とし、 以下の式(5)を基に水みちへの流出量を求めた。なお、 1 冬期毎に解析を行い求められた空隙含水率の閾値を St-1、3 冬期すべてのデータを合わせて求められたも のを St-2 とし、これらの両方について水みちへの流出 量を求めた。

$$MF_r = \frac{\sum_{i=1}^n h_{MF_i}}{HS} \times 100 \tag{4}$$

ここに *h_{MF}*:それぞれのざらめ雪層の厚さ(m)、*n*: ざらめ雪層の数、*HS*:積雪深(m)。

$$A_{wc}(t) = (S_{rk}(t) - S_t) \times (1 - \theta_{vol,i,k}(t)) \times \rho_w \times h_k(t)$$
(5)

ここに $S_{rk}(t)$:浸潤前線における空隙含水率、 $\theta_{vol.i.k}(t)$:計算上の浸潤前線における体積当たりの 雪に対する氷の割合、 ρ_w :湿雪の密度(kg m-3)、 $h_k(t)$:計算上の浸潤前線における積雪層の厚さ(m)。

また、飽和透水係数の式は Calonne et al. (2012)²⁰⁾に よって提案されたものに、水分特性曲線の式は Yamaguchi et al. (2012)²¹⁾によって提案されたものに変 更することによって粒径の異なる積雪層境界における 滞水の再現性向上を図った。計算に必要となる気温、 湿度、降水量(雨と雪)、風速、気圧、地面への熱の流 量は平地に設置された気象観測点において観測された ものを用いた。

斜面における下向き短波放射量は、以下に示す方法 により算出した直達放射量、大気散乱放射、地表面散・ 乱放射の和によって求めた。なお、このときの周囲の 地形による直達放射の遮断の影響は考慮しなかった。

まず、平地での直達放射および大気散乱放射を、平 地の気象観測点で観測された下向き短波放射量から、 Reindl et al.,(1990)²²⁾の手法により推定した。



表 - 2 各冬期の解析結果				
観測期間	S _t -1 (%)	RMSE for MF_r (%)	CA _{wc} (mm)	<i>AWC</i> _r (%)
2011-12	7.41	1.9	27.4	1.9
2012-13	7.22	12.6	246.1	17.2
2013-14	7.20	6.4	210.1	18.6

CA_{wc}:累計水みち流下量,AWC_r:積雪表面から供給 された水の量の累計に対する累計水みち流下量の割合

表 - 3 S_t-2 (7.31%)を用いた際のCA_{wc}、AWC_rの計算 結果と*MF_r*の計算値の RMSE

観測期間	RMSE for <i>MF_r</i> (%)	CA _{wc} (mm)	AWC _r (%)
2011-12	4.2	88.4	6.0
2012-13	13.6	92.7	6.5
2013-14	8.9	41.9	3.7



図 - 16 各冬期のざらめ率の実測と計算値の推移



図 - 17 各冬期における積雪構造の実測と計算値の推移



図 - 18 各冬期における積算水みち流量の計算値の推移

・斜面での直達放射は、上記の値を元に太陽光と斜 面のなす角度を用いて求めた。

・斜面での大気散乱放射は、上記の値を元に平地の
 大気散乱放射から、Perez et al.(1990)²³⁾の手法により推定した。

・斜面での地表面散乱放射は、上記の値を元に斜面 の方位と傾斜角の関係から幾何学的に求めた。

斜面における上向き短波放射量は、平地の気象観測 点で観測されたアルベドと斜面のアルベドが同じ値と 仮定し算出された斜面の下向き短波放射を用いて求め た。

5.2.3 結果と考察

観測地における各冬期の12月~4月の気象観測結果 を図 - 15 に示す。観測地における最大積雪深および 積算降雨量は、2011-12 年 (最大積雪深:302 cm、積 算降雨:376.4 mm)、2012-13 年 (293 cm、312.6 mm)、 2013-14 年 (189 cm、354 mm)であった。降雨は 1~2 月の厳冬期にもしばしばみられ、各冬期における 1~ 2 月の積算降雨量は 2011-12 年:63.1 mm,2012-13 年: 57.8 mm,2013-14 年:59.6 mm であった。また、観測期 間中(12 月~4 月)の各冬期の平均気温は 2011-12 年: 5.6 、2012-13 年:6.0 、2013-14 年:6.7 といず れの年も0 を上回っており、1月2月においても日最 高気温が0 を上回る日が度々みられる。

解析結果を表 - 2、表 - 3 および図 - 16~図 - 18 に示す。 S_{r} 1 は 7.20~7.41%(RMSE1.9~12.6%)、 S_{r} 2 は 7.31%(RMSE4.2~13.6%)となった。これらの閾値 を用いて算出された水みちへの流出量は 27.4~246.1 mm と年によって大きく異なる値となった。これらの 値は水の全供給量の 2~20%に相当する。ざらめ率に ついては、 S_{r} 1を用いた方が S_{r} 2を用いるよりも再現 性は高いが、 S_{r} 2を用いても RMSE10%程度で再現で きることがわかった。いずれの年においてもしまり雪 が積雪中層付近に残っている状態や全層ざらめ雪とな る時期等の特徴が再現されている(図 - 17)。

一方、水みちへの流出量は、*S_r*-1 と *S_r*-2 の値僅かな 差異によって、時には 2 倍 ~ 3 倍程度の差異がもたら されている(表 - 2、表 - 3 および図 - 18)。

以上より、今回示した手法を用いて水みちへの流量 を調整することによって斜面積雪の積雪構造および雪 質の再現性を高めることができた。

6. スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検討

斜面積雪の安定性を評価する際の指標として積雪中 の弱層のせん断強度と弱層の上載積雪荷重によっても たらされる斜面方向の応力の比である積雪安定度(SI) が提案されている(たとえば Roch, 1966²⁴⁾, Perla, 1977²⁵⁾等)。しかし、図 - 19 に示したように雪崩が発 生する際には、弱層におけるせん断破壊のみでなく、 スラブ(雪崩層)の四方(上部破断面、左右の側部破断面、 下部破断面)において破壊が起こる。そこで、スラブ (雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度について、1 冬 期間にわたってスラブの強度を考慮した安定度を計算 し、従来の SI と比較することによってその有用性に ついて検討を行った。





6.11冬期間における安定度の算出方法 6.1.1スラブの強度を考慮した積雪安定度

スラブの四方における破壊を上部破断面:引張破壊、 側部破断面:せん断破壊、下部破断面:圧縮破壊とそ れぞれ仮定し、不安定条件として「駆動力>弱層の強 度+スラブの強度」について試算を行った。なお、斜 面の形状やスラブにおけるクラックの発生状況を考慮 して提案された4種類の安定度に加え比較対象として 従来の安定度(SI)を算出した(表 - 4)。

$SI=\sigma_w/W \cdot sin\theta cos\theta$	(6)
$SIwcfs = \{blo_w + bh(o_c + o_s) + 2lho_f\} / blW \cdot \sin\theta \cos\theta$	(7)
$SIwcf=(blo_w+bho_c+2lho_f)/blW\cdot\sin\theta\cos\theta$	(8)
$SIwfs = (blo_w + bho_s + 2lho_f) / blW \cdot \sin\theta \cos\theta$	(9)
$SIwf = (blo_w + 2lho_f) / blW \cdot \sin\theta \cos\theta$	(10)
が スラブの幅 (m)	
ⅈ スラブの長さ (m)	
h: スラブの厚さ (m)	
W:単位水平面積当たりの積雪荷重(N・m ⁻²	2)
$\sigma_{\!w}\!\!:$ 弱層のせん断強度(N・m $^{-2}$)	
$\sigma_{\!c^{\!:}}$ 上部破断面の引張強度(N・m $^{\cdot 2}$)	
<i>o</i> デ側部破断面のせん断強度(N・m ⁻²)	
$\sigma_{\!\!s^{\!\!\!\!\circ}}$ 下部破断面の圧縮強度(${f N}\cdot{f m}^{-2}$)	
<i>θ</i> .斜面勾配(°)	

			_12
女正度	想定する斜面状況	考慮する強度	式
SI	従来の安定度	弱層の強度のみを 考慮	(6)
SIwcfs	スラブの四方の支 持が有効な状態を 想定	弱層,上部,側部 (左右),下部破断 面の強度を考慮	(7)
SIwcf	地形条件,除雪等 により,スラブの 下部の支持が得ら れない状態を想定	弱層,上部,側部 (左右)破断面の強 度を考慮	(8)
SIwfs	クラックの発生に より,スラブの上 部の支持が得られ ない状態を想定	弱層,下部,側部 (左右)破断面の強 度を考慮	(9)
SIwf	スラブの上部,下部 双方の支持が得ら れない状態を想定	弱層,側部(左右)破 断面の強度を考慮	(10)

表 - 4 各安定度と想定する斜面状況 (不安定条件:駆動力>弱層の強度+スラブの強度)

6.1.2 積雪強度の算出方法および斜面勾配

 σ_w および σ_f は、山野井・遠藤(2002)⁹⁾の手法を用いて 積雪密度と含水率より求めた。 σ_c については Keeler and Weeks (1968)²⁶⁾が求めた乾雪における引張強度とせん 断強度の比 27.3:4.2 を用いてせん断強度から求めるこ ととした。また、 σ_s については、低密度の雪においては 圧縮強度と引張強度に大きな差がないとされる(前 野・黒田,1986)²⁷⁾ことから σ_c と同じと仮定した。この ため *SIwcf と SIwfs*の計算結果は、同じ値となるので以 降は両方の計算結果を個別には示さず、*SIwcf(SIwfs)* と表示する。なお、 斜面勾配 については、ここでは 雪崩発生頻度のピークである 40° (McClung and Schaerer, 2006)²⁸⁾に設定している。

6.2 結果と考察

各安定度の算定結果の例として SI(従来の安定度): 図 - 20、SIwcfs100(スラブ規模 100×100m、スラブの 四方の支持が有効):図 - 21、SIwcfs50(スラブ規模 50 × 50m、スラブの四方の支持が有効) : 図 - 22、 Slwcfs10(スラブ規模 10×10m、スラブの四方の支持が 有効):図-23、SIwcf/10(スラブ規模10×10m、スラ ブの上部または下部および側部の支持が有効):図-24、SIwf10(スラブ規模 10×10m、スラブの側部の支持 が有効):図-25を、表-5に各安定度における不 安定状況の発生時間をそれぞれ示す。なお、表 - 5 に おいては不安定を示唆する目安として支持力が駆動力 を下回る安定度<1、しばしば目安として用いられる安 定度<1.5 と安定度<4.0(Roch, 1966²⁴⁾, Perla, 1977²⁵⁾)と なった時間とそれらの根雪期間(3189h)に対する割合 (%)を示してある。これらの計算結果から、スラブの規 模が 100×100m であると従来の SI と大きな差となら

ないが、スラブの規模が 50×50m、10×10m と小さく なるほど差が大きくなることがわかる。例えば不安定 の基準を安定度<1.5 とした場合、不安定となる時間は SI: 1377時間(根雪期間の43%)に対しSIwcfs100: 1135 時間(36%)、SIwcfs50:993 時間(31%)、SIwcfs10:305 時間(10%)である。一方、スラブの規模が 10×10m で あっても上部(または下部)の支持が得られない Slwcf(Slwfs10)では、不安定となる時間は569時間(18%)、 側部のみの支持力が有効である SIwf10 では、不安定と なる時間は 991 時間(31%)であり、スラブの支持力の有 効性を考慮することによって安定度の計算結果が大き く異なってくることがわかる。従来のSIを用いた場合、 1 冬期間の 4 割もの期間において積雪が不安定と評価 されるが、実際には考えがたいことから、SIによって 不安定と評価された期間の中には、実際には積雪が安 定している状態を不安定と評価する「空振り」が多く 含まれていると考えられる。

図 - 26 に SI と SIwcfs10 の最小値(各時点における 積雪全層中の最も安定度が低い個所の値)の推移を示 す。Iwcfs10 は、SI に比べて全体的に安定度が高く示さ れているが、特に 3 月中旬以降その差が大きくなって いる。これは、SI においては、積雪下部から中間部に おける脆弱な積雪による不安定性が継続しているのに 対し、Iwcfs10 では、積雪下部から中間部に脆弱な箇所 が存在しても、スラブの強度によって積雪を支えうる と評価しているからである。

また、*Slwcfs*10 においては時には安定度が急激に下 がっている箇所が度々みられるが、これらは、新たな 降雪や表面融解によってもたらされた表層付近の不安 定性を表現しているものであり、表層付近の安定性に 関してはスラブの強度はそれほど貢献していないと考 えられる。

以上より、斜面の規模、スラブの支持の状態にもよ るが、積雪の安定性を見積もる上で、スラブの強度は 無視できない要素であるといえる。特に全体的に密度 の高い融雪期において、規模が小さい斜面ではスラブ の強度の影響は大きくなると考えられる。これらによ って、実際には安定している状況を不安定と評価する 「空振り」を従来の安定度よりも削減し、より適切に 安定度を算出できる可能性があるといえる。



60

64

86

Slwcfs10

SIwf10

)

Slwcf Slwfs10

2

4

19

54

143

590

305

569

991

10

18

31

1908

2038

2743

2

Feb-12

eb-12 eb-12

SIと SIwcfs10 の最小値の推移

lar-

Jan-12 Jan-12

-ue

図 - 26

Apr-12

12

Apr-

7. 冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術の提 案と事例解析

ここでは、本研究によって得られた各成果を統合し、 冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術を提案 する。さらに事例解析を行うことによって提案した危 険度評価技術の有用性の検証を行う。

7.1 危険度評価技術の提案

本研究において開発した積雪モデルは、積雪内の水 の浸透における水みちの影響を考慮した Katsushima et al. (2009)¹⁹⁾を基本とし、透水係数等の最新の知見を反 映するとともに、斜面積雪に応用するために帯水層の 含水率の閾値や水みちへの流出量の設定値を、十日町 における3冬期の観測データと比較して検討を行い、 融雪時の斜面における積雪構造の再現性を向上させた ものである(5.参照)。この積雪モデルによる積雪密度 と含水率の計算値から積雪各層の積雪安定度を計算し た。ただし、従来の積雪層底面のせん断方向の強度と 応力の比で表される安定度は、降雪の度に小さくなっ て継続することがあり、実際には安定化した積雪でも 安定度が小さくなる場合があった。そこで、筆者らは スラブ(雪崩層)の強度を考慮した安定度(6.参照) つまりスラブの斜面上部の引張強度、斜面下部の圧縮 強度、側面のせん断強度の合計値とスラブの質量によ る応力の比を湿雪雪崩の危険度評価に用いることとし た。これにより、安定度にメリハリができ、斜面規模 に応じた積雪安定度が算出可能となった。図 - 27 にこ こで提案する危険度評価技術の概要を示す。



図 - 27 提案する危険度評価技術の概要

7.2 事例解析

7.2.1 対象とした事例

湿雪雪崩発生の評価手法の試行は、土木研究所で実施の新潟県糸魚川市能生地区柵口の観測データ(2002 年12月~2003年3月)を用いた。この観測地では、 カメラと地震計により雪崩の発生を記録し、気温、積 雪深、日射等を観測している(図-28)。雪崩種類の判 断は、記録映像と気象データから推定し、一日毎に雪 崩発生数を集計した。



図 - 28 事例解析対象地



7.2.2 事例解析結果

図 - 29 に、本研究で開発した積雪モデルを用いて 計算した、積雪の層構造、含水率、安定度の時間変化 を示す。図 - 29 より、上述の積雪モデルを用いるこ とにより、しまり雪からざらめ雪への層構造の変化 図 - 29a) 含水率と滞水する可能性にある層(図 - 29b) が再現され、積雪層内に安定度が低く、積雪の破壊が 起こる可能性のある時期を箇所(図 - 29c)が推定さ れた。また、図 - 29d に、積雪内の安定度の最小値の 時系列と雪崩の発生件数を比較した。安定度が低くな るときに、湿雪表層雪崩や湿雪全層雪崩の発生件数が 多くなることから、ここで示した積雪モデルを用いた 斜面積雪の安定度により、湿雪雪崩発生に関する評価 が可能と考えられる。ただし、融雪期後半で湿雪全層 雪崩の発生件数が多くなる時期では安定度が高く推定 された(図省略)。融雪期後半の湿雪全層雪崩に対する 発生評価、特に積雪底面の破壊やすべりなどの影響を 考慮すること等が今後の課題である。

8. まとめ

湿雪雪崩発生条件の解明と、湿雪雪崩の危険度評価 技術の検討を行った。結果は以下のとおりである。

8.1 湿雪雪崩事例の気象解析

湿雪雪崩発生の気象条件として、厳冬期の2月は少 ない水の供給量で湿雪表層雪崩が発生する傾向にあり、 融雪期の3月は水の供給量が多く湿雪全層雪崩が発生 する傾向にあることがわかった。

8.2 積雪内の水の浸透に関する実験

しまり雪主体の斜面では、水は積雪層に沿って斜面 下方に流れる傾向があり、積雪底面には容易に到達し ない。しかし、ざらめ雪が多くなると、水は積雪底面 へ浸透していく。このような雪質などによる水の浸透 の違いが、雪崩事例の気象解析でみられた湿雪雪崩の 発生形態(全層、表層)を決める一要因になると考え られる。

8.3 多層構造をもった積雪に対する人工降雨実験

降雨後の推移は斜面と平面で概ね類似した傾向を示 した。雪温が 0 となった積雪層の高さに関しては、 斜面の方がより早く積雪下層まで到達する結果となっ ているが、これは斜面の特性ではなく、ばらつきの問 題である可能性もあるため今後さらなる検討が必要で ある。

8.4 水の浸透や帯水層の形成を再現することが可能な 積雪モデルの開発

水の浸透や帯水層の形成を再現することが可能な積 雪モデルの開発を行った。特に、平成23年度冬期、平 成 24 年度冬期、平成 25 年度冬期の3 冬期分の斜面積 雪の観測結果を基に積雪モデルにおいて水みちが形成 される空隙含水率の閾値を検討した。結果として閾値 を1 冬期毎に設定した方が精度が高まるものの、3 冬 期分合わせて設定した閾値を用いても RMSE:10%程 度の精度でざらめ率を再現できることがわかった。こ れにより、積雪モデルによる斜面積雪の層構造などの 再現性が向上した。

8.5 スラブ(雪崩層)の強度を考慮した積雪安定度の検 討

スラブの強度を考慮した安定度の計算手法を用いて 1 冬期間における安定度の試算を行った。結果として 提案した安定度と従来の安定度では、不安定と評価 される期間に大きな差が現れることがわかった。この ことから積雪の安定性を見積もる上で、スラブの強度 は無視できない要素であるといえる。特に全体的に密 度の高い融雪期において、規模が小さい斜面ではスラ ブの強度の影響は大きくなると考えられるため、本研 究で提案した安定度が有効であると考えられる。

8.6 冬期の降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術の 提案と事例解析

本件研究によって得られた各成果を統合し、冬期の 降雨等に伴う雪崩災害の危険度評価技術を提案した。 さらに事例解析を行うことによって提案した危険度評 価技術の有用性の検証を行った。結果として安定度の 変化と雪崩の発生状況が良く一致しており、湿雪雪崩 発生に関する評価が可能と考えられる。ただし、融雪 期後半の湿雪全層雪崩に対する発生評価、特に積雪底 面の破壊やすべりなどの影響を考慮すること等が今後 の課題として残った。

参考文献

- 1) 気象庁:異常気象レポート 2005, pp383, 2005
- 2) 中村一樹・石本敬志: 2010年2月下旬に広域に発生し た全層雪崩について,北海道の雪氷,29号,8-11,2010
- 満山宏太郎・大野宏之・小南靖弘・井上聡・川方俊和: 冬期における降水量計の捕捉特性,雪氷,65,303-316, 2003
- 4) 近藤純正・本谷研・松島大:新バケツモデルを用いた 流域の土壌水分量,流出量,積雪水当量,及び河川水 温の研究,天気,42,821-831,1995
- 5) 近藤純正・中村亘・山崎剛:日射量および下向き大気 放射量の推定,天気,38,41-48,1991
- 6) 水津重雄:広域に適用可能な融雪・積雪水量モデル,雪
 氷,64,617-630,2002
- 7) Kawashima, K., T. Yamada and G. Wakahama: "Regional division of snow-depositional environments and metamorphism of snow cover in plain areas along the Japan Sea coast ", IAHS Publication, No.223,

pp.187-196, 1994

- 4) 山野井克己・竹内由香里・村上茂樹:プッシュゲージ を用いた斜面積雪安定度の推定.雪氷,66,669-676, 2004
- 9) 山野井克己・遠藤八十一:積雪におけるせん断強度の 密度および含水率依存性.雪氷,64,4431-451,2002
- 10) 竹内由香里・遠藤八十一・村上茂樹・庭野昭二:2005/06 年冬期の十日町における積雪の硬度特性.雪氷,69, 61-69,2007
- 11) (社)日本雪氷学会(編):積雪観測ガイドブック,朝倉書 店,2010
- 12) 若浜五郎:積雪内に於ける融雪水の移動 ,低温科學, 物理篇 21,45-74,1963
- 13) 若浜五郎・中村勉・ 遠藤八十一:積雪内における融雪 水の移動 ,低温科學,物理篇 26,53-76,1969
- 14) Brun, E., E.Martin, V.Siomn, C.Gendre, and C.Coleou: An energy and mass model of snow cover suitable fort operaional avalanche forecasting. Journal of Glaciology, 35, 333-342, 1989
- 15) Brun, E.P. David, M.Sudul and G. Brunot: A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. Journal of Glaciology, 38, 13-22, 1992
- 16) Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown, C. Fierz and P. Satyawali: A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part :Snow microstructure. Cold Regions Science and Technology, 35, 147-168, 2002
- 17) Lehning, M., P. Bartelt, B. Brown, and C. Fierz : A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part :meteorological forcing, thin layer formation and evaluation.Cold Regions Science and Technology, 35, 169-184, 2002
- 18) Hirashima H., Yamaguchia S., Satoa A., Lehningb M.: Numerical modeling of liquid water movement through layered snow based on new measurements of the water retention curve. Cold Regions Science and Technology, 64, 94-103, 2010
- 19) Katsushima, T., T. Kumakura and Y. Takeuchi: "A multiple snow layer model including a parameterization of vertical water channel process

in snowpack". Cold Regions Sci. Technol., Vol.59, pp.143-151, 2009.

- 20) Calonne, N., Geindreau, C., Flin, F., Morin, S., Lesaffre, B., Rolland du Roscoat, S., Charrier, P., 2012.3-D image-based numerical computations of snow permeability: links to specific surface area, density, and microstructural anisotropy. The Cryosphere, 6, 939-951
- 21) Yamaguchi, S., Watanabe, K., Katsushima, T., Sato, A., Kumakura, T., 2012. Dependence of the water retention curve of snow on snow characteristics. Ann. Glaciol. 53(61), 6-12.
- Reindl, D.T., Beckman, W.A., Duffie, J.A., 1990.
 Diffuse fraction correlations. Solar Energy 45(1), 1-7.
- 23) Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., Stewart, R., 1990. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. Solar Energy 44(5), 271-289.
- 24) Roch, A., 1966: Les variations de la resistance de la neige. Proceedings of the International Symposium on Scientific Aspects of Snow Avalanches, IAHS Publ., No. 69, 86-99.
- Perla, R., 1977: Slab avalanche measurements. Can. Geotech. J., 14(2), 206-213.
- 26) Keeler and Weeks, 1968: Investigations into the mechanical properties of alpine snow-packs, Journal of Glaciology, Vol. 7, No50, 253-271.
- 27) 前野・黒田, 1986:雪氷の構造と物性(基礎雪氷学講座 第 巻,古今書院, 209pp.
- 28) McClung, D. and Schaerer, P., 2006. The Avalanche Handbook. Seattle, WA, The Mountaineers, pp. 271.

RESEARCH ON RISK EVALUATION OF SNOW AVALANCHE HAZARD INDUCED BY WINTER RAIN EVENT

Budget : Grants for operating expenses General account Research Period : FY2011-2014 Research Team : Erosion and Sediment Control Research Group (Snow Avalanche and Landslide Research Center) , Cold-Region Road Engineering Research Group (Snow and Ice Research Team) Author : AKIYAMA Kazuya MATSUSHITA Hiroki IKEDA Shinji MATSUZAWA Masaru ITO Yasuhiko UEDA Masayo HARADA Yusuke

Abstract : There are concerns that wet-snow avalanches will become more frequent with increases in winter temperature. However, it is difficult for avalanche safety administrators to evaluate the risk of wet-snow avalanches, because not much is known about the conditions under which such avalanches occur. Toward proposing a method for evaluating the likelihood of wet-snow avalanches, we performed meteorological data analysis using past avalanche events, field experiments on water infiltration in snowpack, laboratory experiments of artificial rain on a multi-layered snowpack, development of numerical snow pack models which can represent the water infiltration and the impermeable process, theoretical examination of stability index considering slab strength, and finally a hazard evaluation method of wet-snow avalanche including winter rain event induced avalanche was proposed.

Key words : wet snow avalanche, numerical snow pack model, rain on snow, melting of snow, snow pack on the slope, snow pit observation.